

초고압차단기 절연설계 표준화를 위한 3차원 전계해석

김진수, 최명준, 최영찬, 김익모, 김종구, 박일한
 현대중공업(주) 기전연구소, 성균관대학교 전기전자컴퓨터 공학부

3D Electric Field Analysis for the Standardization of the Insulation Design of GIS

J.S. Kim, M.J. Choi, Y.C. Choi, I.M. Kim, J.G. Kim, I.H. Park
 Hyundai Electro-Mechanical Research Institute, Sungkyunkwan Univ.

Abstract - In this study, BIEM(Boundary Integral Equation Method) using Green's function is applied in order to analyze 3D electric field precisely. The algorithm is developed with equivalent electric surface charge as a variable, which promises less unknown variables and higher accuracy of electric field analysis. The validity of the developed program is varified by applying it to a coaxial cylinder mode and 3-phase GIS model.

1. 서 론

초고압차단기(GIS)의 동작특성 해석 및 설계에 필요한 기술은 전계, 자계 등의 전기분야 뿐만 아니라 열전달, 유체역학, 구조해석, 방전해석 등으로 여러 물리적 현상이 복합적으로 결합되어 나타나는 복합결합시스템의 종합적 해석기술이 요구된다. 이 중에서 기본적인 해석기술은 GIS가 일반적으로 3차원구조를 갖는 고압기기이므로 전기적 특성에 대한 해석기술이며, 특히 3차원 전계의 정밀해석기술은 절연설계의 기반이 되는 핵심해석기술이다.

여러 고압기기의 전계해석 문제를 다루기 위해서는 3차원 모델링을 피할 수 없으나 유한요소법을 사용한 전계의 3차원해석은 현실적으로 어려움이 있다. 우선 해석 대상의 기하학적 형상모델링을 위한 일반적이고 편리한 도구(geometrical modeler)의 개발이 상당히 어렵고 이를 사용한다고 할 지라도 복잡한 구조일 경우는 모델의 Meshing과 그래픽에 의한 3차원 형상표현이 상당히 어렵다. 이것은 전자기현상의 특성상 전자기장은 매질이 없는 공기 부분에도 존재하기 때문이다. 이러한 특성이 기계공학의 구조해석, 유체해석, 온도해석 등과 전자기장 해석의 차이일 뿐만 아니라 어려움을 주는 주된 이유가 된다. 또한 3차원 유한요소법을 사용할 경우 시스템방정식의 미지수가 엄청나게 증가하게되어 컴퓨터의 많은 메모리용량과 빠른 프로세서의 사용이 필요하고 계산시간이 상당히 길어진다. 이러한 과정 중에 수치해석의 오차누적에 따른 계산의 정확도에 문제가 발생하게 된다.

본 연구에서는 3차원 전계해석을 정확하게 해석할 수 있는 Green's Function을 이용한 경계적분방정식법(BIEM)을 적용하였다. 이 방법은 우선 모델의 매질이 존재하는 표면에 대해서만 이산화가 필요하므로 3차원 모델링이 유한요소법에 비하여 상당히 간단하고, Green's Function 자체로서 무한경계조건이 자동으로 만족되어 경계조건을 적용할 필요가 없으므로 개영역문제(Open Boundary Problems)에 적합하다.

또한 본 연구에서는 여러 경계적분방정식법 중 미지변수의 수가 적고 전장해석의 정확도가 높은 등가표면전하(Equivalent electric surface charge)를 변수로 한 알고리즘을 개발하고 프로그램을 작성하였다. 그리고 해석적 해가 존재하는 동심상 실린더 모델에 적용하여 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 경계적분법을 이용한 3차원 정밀전계해석

2.1.1 경계조건을 이용한 지배방정식 도출

주어진 전기장 \vec{E}_S 내에 놓여 있는 선형 유전체의 내부와 외부에서의 전계를 해석하기 위하여 3차원 BIEM을 적용하면 다음과 같다.

그림 2.1과 같이 선형 유전체의 내부와 외부 영역을 각각 Ω^+, Ω^- 라 하고, 두 영역의 경계를 Γ 라고 한다.

각 영역의 포텐셜은 Laplace방정식을 만족하므로, 다음과 같다.

$$\nabla^2 \phi^+ = \nabla^2 \phi^- = 0 \tag{2.1}$$

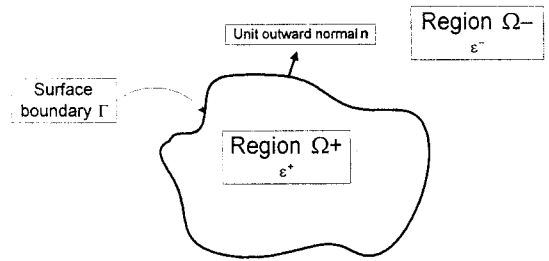


그림 2.1 두 유전체로 이루어진 계

각각의 영역에 대한 식(2.1)의 해는 유일(unique)하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi^+ = \phi^- = \phi_s \tag{2.2}$$

여기서, ϕ^+ 은 Ω^+ 영역에서의 스칼라 전위이고, ϕ^- 은 Ω^- 영역에서의 스칼라 전위이다.

정전계에서의 경계조건을 고려하여 경계 Γ 위에서의 각각의 영역의 전속밀도를 \vec{D}^+, \vec{D}^- 라고 하면, 전속밀도의 경계에서의 법선성분의 값은 서로 같으므로

$$\vec{D}^+ \cdot \hat{n} = \vec{D}^- \cdot \hat{n} \tag{2.3}$$

이고, 두 매질 모두 선형이라고 가정하면, 위의 식을 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\epsilon^+ \vec{E}^+ \cdot \hat{n} = \epsilon^- \vec{E}^- \cdot \hat{n} \tag{2.4}$$

위의 식에서 ϵ^+, ϵ^- 는 각 영역에서의 비유전율이다.

\vec{E}_S 에 의해 유전체구의 표면에 유도된 속박전하로 인해 발생한 쌍극자(dipole)에 의한 전계를 \vec{E}_i 라고 하면 구 내부와 외부의 전계를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{E}^+ &= \vec{E}_S + \vec{E}_i \\ \vec{E}^- &= \vec{E}_S - \vec{E}_i \end{aligned} \tag{2.5}$$

전계는 보존장(conservative field)이므로, 위의 식에서 유도된 전계 \vec{E} 를 스칼라 전위의 기울기(gradient) $\nabla\phi_e$ 로 나타낼 수 있고, \vec{E} 와 $\nabla\phi_e$ 에 대해서 양변을 각각 정리하면 다음과 같다.

$$\epsilon^+ \nabla\phi_e - \epsilon^- \nabla\phi_e = \epsilon^+ \vec{E}_s \cdot \hat{n} - \epsilon^- \vec{E}_s \cdot \hat{n} \quad (2.6)$$

적분항을 정돈하여 표현하기 위해 3차원 등방성 매질에 대해서 식(2.7)로 표현되는 Green 함수를 도입하여 식(2.6)을 정리하면, 식(2.8)과 같은 적분지배방정식이 도출된다.

$$G(\vec{r}_j, \vec{r}_s) = \frac{1}{4\pi r} \quad (2.7)$$

위 식에서 $r = |\vec{r}_j - \vec{r}_s|$ 이다. r_s 는 근원점(source point)이고, r_j 는 계점(field point)이다.

$$\frac{1}{2} \sigma(r_s) + \lambda \int_A \sigma(r_s) \nabla G(\vec{r}_j, \vec{r}_s) \cdot \hat{n} ds = \lambda E_n \quad (2.8)$$

여기서 $\lambda = \frac{(\epsilon^+ - \epsilon^-)}{(\epsilon^+ + \epsilon^-)}$ 이고, σ 는 전하밀도이다.

2.1.2 지배적분방정식의 이산화

이산화기법 중에서 해석영역의 이산화와 그것에 따른 각각의 영역 위에서의 미지함수의 근사표현은 요소라고 하는 개념을 도입한다. 경계요소는 경계의 형상을 근사적으로 나타내기 위하여 도입하는 선분을 나타내고, 이 경계요소 위에서의 미지함수의 근사형을 포함한다.

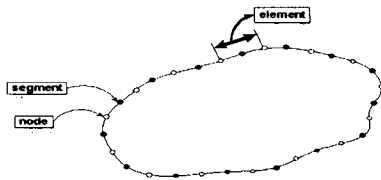


그림 2.2 경계요소

경계요소의 형상을 결정하기 위하여 필요한 점인 분할점(segment point)과 이 점 위에서의 함수치를 표현하기 위하여 필요한 점인 절점(node point)을 구별하여 그림 2.2에 보인 것처럼 경계요소 위에서 미지함수를 일정하게 근사시키는 일정요소를 이용한 이산화과정은 다음과 같다.

경계를 총 개수가 N개인 요소로 나누고, 각 분할점의 중간에 절점을 취하였다. 주어진 한 절점 i에서 식(2.8)을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} \sigma_i(r_j) + \sum_{j=1}^N \lambda_j \int_{\Gamma_j} \sigma_j(r_s) \nabla G(\vec{r}_j, \vec{r}_s) \cdot \hat{n} ds = \lambda_j E_n \quad (2.9)$$

위 식에서 Γ_j 는 요소 j에서의 경계이고, E_n 은 각 요소에서의 일정전계의 수직성분이다. 그리고, λ_j 는 두 매질의 오직 비유전율에 대한 함수이고, 매질은 모두 선형이므로 각 매질에 대한 비유전율의 값은 같으므로, λ_j 를 λ 로 표현할 수 있다.

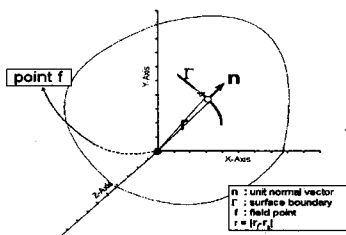


그림 2.3 기본해의 r의 방향과 법선방향

(2.9)식의 좌변의 첫 번째 식은 $i \neq j$ 인 경우에 0이 되며, $i = j$ 인 경우의 두 번째 식은 다음 식으로 표현된다.

$$\int_{\Gamma_i} \nabla G(\vec{r}_j, \vec{r}_s) \cdot \hat{n} ds = \int_{\Gamma_i} \frac{\partial G}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial n} ds = 0 \quad (2.10)$$

그림 2.3과 같이 기본해의 r의 방향이 경계 Γ 에 종속하여 법선벡터 \hat{n} 의 방향과 같게 되므로 식(2.10)의 결과와 같이 0이 된다. 그러므로, 식(2.9)는 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \sigma_i(r_j) + \sum_{i,j=1}^N \sigma_i S_{ij} = \sum_{i=1}^N T_i \quad (2.11)$$

여기서 $S_{ij} = \int_{\Gamma_j} \nabla G(\vec{r}_j, \vec{r}_s) \cdot \hat{n} ds$, $T_i = E_n$ 이다.

2.1.3 정밀전계해석 프로그램 구성

경계적분법을 이용한 3차원 정밀전계해석 프로그램의 구성은 그림 2.4에 나타난 바와 같이 전처리과정, 해석과정, 후처리과정 및 데이터 변환기로 구분할 수 있다. 해석프로그램의 흐름은 다음과 같다.

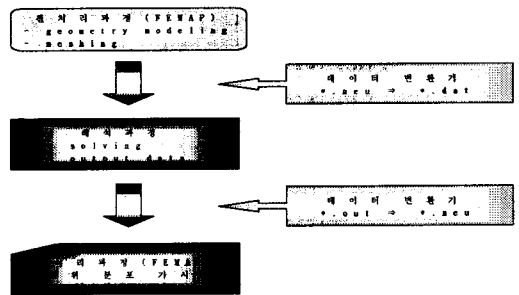


그림 2.4 해석 프로그램 구성도

2.2 적용 사례 및 검증

개발된 3차원 정밀전계 해석 프로그램은 해석해와 갖는 동심상의 실린더모델을 통하여 그 정확도를 검증하였다 또한 프로그램의 일반적인 3차원 모델의 적용성을 검증하기 위하여 3상 차단기 모델의 전계해석을 수행하였다.

2.2.1 동심상의 실린더 모델

해석모델의 구조는 그림 2.5에서와 같이 내부에 반경이 1m인 실린더 형태의 전극에 100V가 인가되고 반경이 2m인 외부 실린더는 접지 되어 있다. 그리고 이 사이에 유전율이 각각 1과 5인 유전체가 채워져 있고 그 경계면은 모델의 중심으로부터 1.5m에 위치한다. 수치해석을 수행하기 위하여 해석모델은 요소 수 2,520개, 절점 수 2,697개의 표면요소로 분할하였고, 이에 대한 요소 분할도는 그림 2.5와 같다.

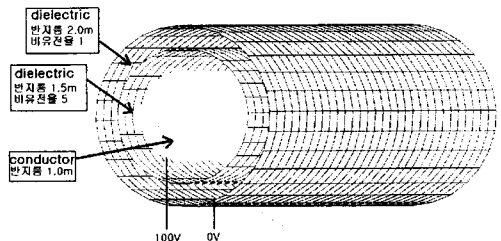


그림 2.5 동심상 실린더 해석모델

그림 2.6과 그림 2.7은 해석모델의 중심에서 반경방향으로의 전위 및 전계분포를 해석해와 일정요소 및 일차

요소를 사용하여 구한 수치해와의 비교를 보여준다. 이들 결과로부터 알 수 있듯이, 수치해는 일정요소보다는 일차요소를 사용하였을 때 해석해에 더욱 근사한 결과를 얻을 수 있다.

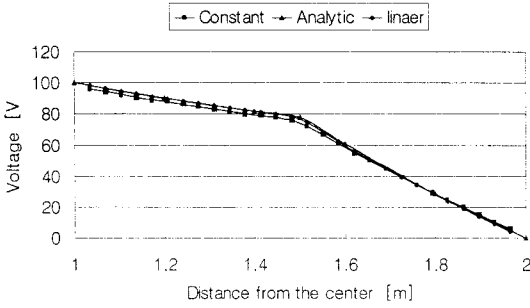


그림 2.6 전위분포 비교

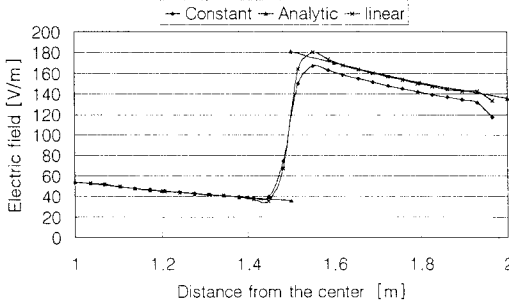


그림 2.7 전계분포 비교

2.2.2 3상 차단기 모델

3상 차단기의 해석모델 및 전압조건은 그림 2.8와 같고 전극에 인가되는 전압은 임의의 한 순간의 공급전압이다. 접지된 탱크 내부에 세 개의 전극봉이 위치하고 있으며 전극봉의 내부 배열 및 구조는 그림 2.9에서 볼 수 있다. 수치해석을 수행하기 위하여 해석모델은 요소 수 9,750개, 절점 수 4,722개의 표면삼각형요소로 분할하였고 이에 대한 요소분할도는 그림 2.8과 같다. 그림 2.9는 탱크부에 유기되는 전계의 세기를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 100 V의 전압이 인가된 전극봉에 위치한 탱크부에서의 전계의 세기가 상대적으로 다른 탱크부에서의 전계세기 보다 크다는 것을 알 수 있다. 그림 2.10은 내부의 전극봉에서의 전계세기 분포를 나타낸다.

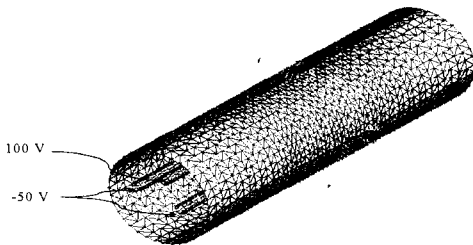


그림 2.8 3상 차단기 해석모델

3. 결 론

본 연구에서는 3차원 전계해석을 정확하게 해석할 수 있는 Green's Function을 이용한 경계적분방정식법을 적용하였다. 이 방법은 해석대상의 기하학적 형상모델링을 위한 도구(geometrical modeler), 모델의 Meshing, 그래

픽에 의한 3차원 형상표현 등이 유한요소법에 비하여 상대적으로 용이하다. 또한 이 방법은 유한요소법에 비하여 시스템방정식의 미지수가 많이 감소하고 비교적 적은 메모리용량이 필요하며 국부적 위치에서 계산의 정확도가 확보된다. 본 연구에서는 여러 경계적분방정식법 중 미지변수의 수가 적고 전장해석의 정확도가 높은 등가표면전하(를 변수로 한 알고리즘을 개발하고 프로그램을 작성하였다. 그리고 개발된 프로그램을 두 수치해석 적용사례에 적용하여 알고리즘의 타당성을 검증하고 유용성을 보였다.

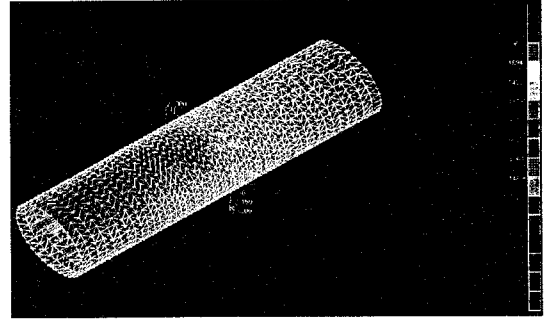


그림 2.9 쉴드부에서의 전계분포

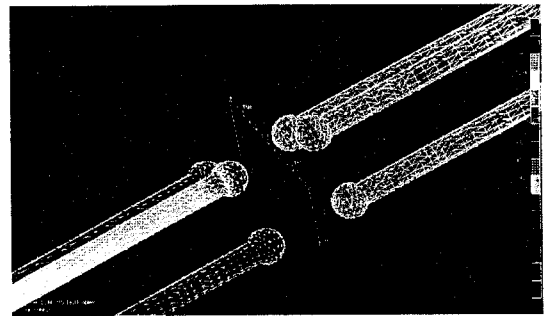


그림 2.10 전극부에서의 전계분포

[참 고 문 헌]

- [1] S. Chakravorti and P. K. Mukherjee, "Application of Artificial Neural Networks for Optimization of Electrode Contour," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.1, No.2, pp.254-264, April 1994
- [2] Narendar S. Goel, Zhonglin Ko, and Fengshi Gang, "Electrostatic Field in Inhomogeneous Dielectric Media II. Volume Element Method," *Journal of computational physics*, 118, pp.180-188, 1995
- [3] Narenda S. Goel, Fengshi Gang, and Zhonglin Ko, "Electrostatic Field in Inhomogeneous Dielectric Media I. Indirect Boundary Element Method," *Journal of computational physics* 118, pp.172-179, 1995
- [4] R. Schneider, P. L. Levin, and M. Spasojevic, "Multiscale Compression of BEM Equations for Electrostatic Systems," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol.3, No.4, pp.482-493, August 1996
- [5] I.S. Yatchev, "Axisymmetrical electric field computation using boundary integral equation method," *Journal of Electrostatics*, 36, pp.277-284, 1996